

Я. Г. Грибик¹, В. И. Зуй², А. Л. Сусленко¹¹*Государственное предприятие «НПЦ по геологии», Минск, Беларусь*²*Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь***ОПЫТ СОЗДАНИЯ ТЕПЛООБМЕННИКОВ В СКВАЖИНАХ ЛЮДВИНОВСКАЯ 1Т И НОВО-ЕЛЬСКАЯ 43Т ПРИПЯТСКОГО ПРОГИБА**

В процессе многолетних нефтепоисковых работ в Припятском прогибе пробурены сотни глубоких скважин. В случае отсутствия во вскрытом разрезе нефтеперспективных горизонтов, после выполнения основного геологического задания, пробуренные скважины ликвидируются. Другая часть скважин в районе нефтяных залежей оказалась за пределами контуров нефтеносности, они также были ликвидированы либо законсервированы. Часть из них можно восстановить, либо отремонтировать и использовать в дальнейшем для извлечения подземного тепла путем создания в них скважинных теплообменников (СТО). Опыт эксплуатации подобных теплообменников в Беларуси отсутствует, однако он известен в других странах [Kohl, et al., 2000].

В литературе сообщается [Калинин, Баранов, 2003], что тепловая мощность таких установок может достигать достаточно высоких значений (до 1–1,5 МВт), что позволяет выполнять теплоснабжение, как отдельных объектов, так и небольших предприятий, либо населенных пунктов. В связи с этим была поставлена задача по проведению опытных работ, чтобы оценить вынос тепла при создании теплообменников в глубоких скважинах в условиях Припятского прогиба.

Для проведения исследований была выбрана 2 скважины. Одна из них - законсервированная скважина Людвиновская 1Т глубиной 4625 м, расположенная в Светлогорском районе Гомельской области в 2,4 км ЮЗ южной окраины д. Горки. Ее ствол был доступен для измерений термометром до глубины 3330 м. Второй скважиной была Ново-Ельская 43Т, расположенная в Ельском районе вблизи д. Даниловка. Ее искусственный забой находился на глубине 2248 м. Эти скважины пробурены в двух различных геотермальных зонах Припятского прогиба.

Технологическая схема опытов в каждой из скважин идентична. Временные теплообменники были созданы посредством спуска колонны насосно-компрессорных труб (НКТ) внутрь обсадных колонн. Выполнен ряд опытов по прокачке пресной воды по замкнутой циркуляционной схеме из накопительной емкости – в СТО и вновь – в емкость, при этом изменяли как направление циркуляции, так и скорость прокачки. На входе и выходе СТО были установлены термометры для регистрации изменения температуры во времени. Одновременно регистрировали скорость прокачиваемой воды.

Для создания СТО в скважине Людвиновская 1Т использован интервал глубины 0–3287 м (температура забоя – около 65 °С), а в скважине Ново-Ельская 43Т – интервал 0–1973 м (температура забоя – около 29 °С). На устье была установлена скважинная арматура, позволяющая подавать с поверхности пресную воду в НКТ и отбирать нагретую воду из кольцевого пространства и наоборот. Вода циркулировала по замкнутому контуру. Она подавалась в скважину как через колонну НКТ (прямая схема циркуляции), так и через кольцевое пространство, образованное между обсадной колонной и НКТ (обратная схема). В процессе нисходящего движения в кольцевом пространстве происходит ее подогрев теплом, поступающим в скважину от массива окружающих горных пород через цементное кольцо и металлическую обсадную колонну. При замкнутой схеме циркуляции вода, откачанная из СТО, возвращалась в емкость, состоящую из двух баков по 20 м³, откуда вновь подавалась в скважину. Стенки баков не имели теплоизоляции, при этом происходила отдача тепла в атмосферный воздух.

В скв. Людвиновская 1Т опыты были проведены осенью с 15 ноября по 3 декабря 2012 г., в скважине Ново-Ельская 43Т – весной с 15 мая по 2 июня 2014 г. Температура наружного воздуха была 2–4 °С в первом случае и в отдельные дни достигала 28 °С во втором случае.

При использовании обратной схемы циркуляции с расходом $10 \text{ м}^3/\text{час}$ в течение всего опыта в СТО Людвиновская 1Т температура воды в баке колебалась от 2 до $6 \text{ }^\circ\text{C}$, а воды на выходе из теплообменника изменялась от $6,5$ до $11 \text{ }^\circ\text{C}$, соответственно, рис. 1.

Следует отметить, что используемые термометры позволяли делать отсчеты температуры не лучше чем $\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Вследствие этого на обеих кривых распределения температуры на входе и выходе СТО наблюдается ряд ступенек иногда несинхронно отражающихся на верхней кривой из-за тепловой инерционности системы.

Также были проведены опыты при расходе воды через СТО 5 и $20 \text{ м}^3/\text{час}$. Они из-за краткости сообщения здесь не приводятся.

Отметим лишь, что графики изменения температуры на входе и выходе СТО имеют аналогичный вид. Колебания температуры (рис. 1) вызваны суточными изменениями температуры наружного воздуха, охлаждавшего воду в баках. Другими словами – происходил неконтролируемый отток тепла из баков в атмосферу.

В СТО скважины Ново-Ельская 43Т также выполнены три опыта с разными темпами прокачки при подаче воды в кольцевое пространство с расходом 10 , 20 и $30 \text{ м}^3/\text{час}$. В качестве примера на рис. 2 приведены графики изменения температуры на входе и выходе теплообменника для второго опыта.

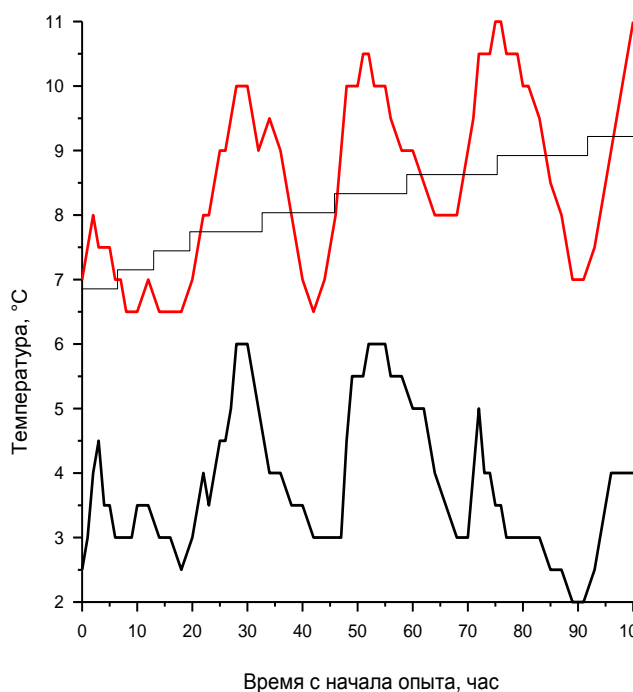


Рис. 1. График изменения температуры при обратной схеме циркуляции и расходе воды $10 \text{ м}^3/\text{час}$ в СТО, скважина Людвиновская 1Т. Обозначения: Температура воды на входе в кольцевое пространство (нижняя кривая), на выходе из НКТ (верхняя кривая) при работе СТО. Ступенчатой линией отмечена тенденция роста температуры на выходе из СТО.

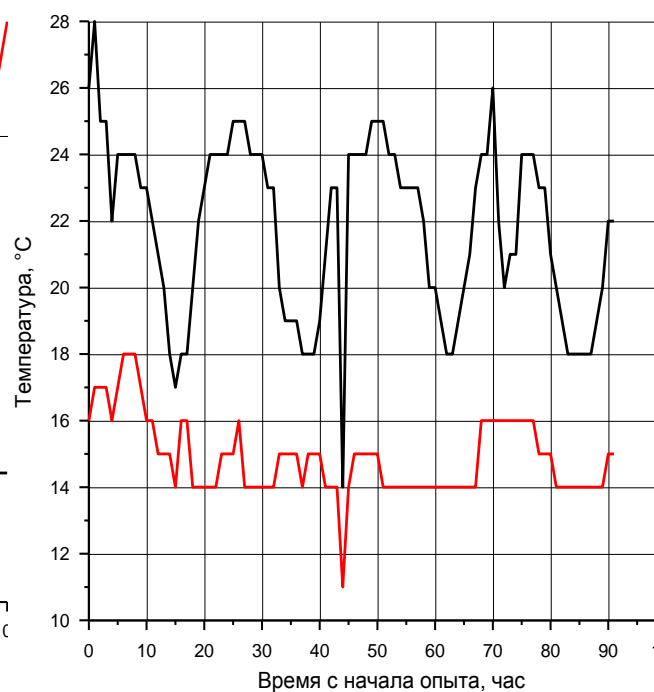


Рис. 2. Изменение температуры при обратной схеме циркуляции и расходе воды $20 \text{ м}^3/\text{час}$ в СТО, скважина Ново-Ельская 43Т. Обозначения: Температура воды на входе в кольцевое пространство СТО верхняя кривая; на выходе из НКТ – нижняя кривая при ее прокачке через СТО.

Как и ранее, вид графика температуры на выходе воды из СТО в целом повторяет ее ритмичное изменение для воды, подаваемой из бака в теплообменник, эти колебания вызваны суточными изменениями температуры наружного воздуха. Однако амплитуда колебаний температуры на выходе СТО оказалась значительно меньшей по отношению к ее значениям на входе. При этом температура на выходе из СТО постоянно оставалась ниже ее значений на входе и находилась чаще всего в интервале $14\text{--}15 \text{ }^\circ\text{C}$. Отрицательный пик температуры для времени 44 час, возможно, является результатом

незарегистрированной кратковременной остановки циркуляции воды через СТО. Такой режим его работы соответствует отдаче тепла от закачиваемой воды в массив горных пород, окружающих ствол скважины и приводит к их нагреванию (моделируется режим кондиционирования объекта), тогда как в скважине Людвиновская 1Т имел место отбор тепла от массива горных пород (режим отопления).

Вынос тепла на i -том интервале времени между двумя отсчетами температуры по термометрам, установленным на входе воды в СТО и на его выходе Q_i равен произведению объемной теплоемкости C_p , умноженной на объем воды V_i , прокачиваемой через скважинный теплообменник в единицу времени, ΔT_i – разность температуры на выходе и входе воды СТО и умноженной на время прокачки t_i .

$$Q_i = C_p \cdot \Delta T_i \cdot V_i \cdot t_i \text{ [Дж]},$$

где $C_p = [\text{Дж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{К})]$, $\Delta T_i = [^\circ\text{К}]$, $V_i = [\text{м}^3/\text{сек}]$, $t_i = [\text{сек}]$.

Общий вынос тепла в Джоулях из теплообменника за время опыта t равен:

$$Q = \sum_{i=1}^n Q_i = \sum_{i=1}^n (C_p \cdot \Delta T_i \cdot V_i \cdot t_i)$$

Результаты расчетов по соотношениям (1) и (2) позволили рассчитать отбор тепла либо его отдачу в массив горных пород. В качестве расчетных значений температуры на входе в СТО приняты средние арифметические значения между температурами в начале и в конце рассматриваемого интервала времени. Аналогичный подход применялся и для определения средней температуры на выходе теплообменника. При этом считали, что объемная теплоемкость циркулирующей воды C_p неизменна и равна $4,20 \cdot 10^6 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{С})$.

Тепловая мощность, отбираемая из СТО в скважине Людвиновская 1Т, отличается для каждого из трех опытов. Она зависит от ряда учитываемых параметров: – температуры на входе и выходе СТО, темпа прокачки воды, схемы циркуляции (подача в НКТ либо в кольцевое пространство) и в определенной мере – от колебания температуры наружного воздуха в течение суток. Тепловая мощность в опытах изменялась более чем на два порядка – от 3 до 57,3 кВт. Полученные результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1. Интервал изменения тепловой мощности СТО скважины Людвиновская 1Т

Номер опыта	Темп прокачки, м ³ /час	Схема прокачки	Подача воды в СТО	Тепловая мощность, кВт
1	10	Обратная	Кольцевое пространство	55,1
2, этап I	20	Обратная	Кольцевое пространство	57,3
2, этап II	20	Прямая	НКТ	32,4
2, этап III	20	Обратная	Кольцевое пространство	29,2
3, этап I	5	Обратная	Кольцевое пространство	3,4
3, этап II	5	Прямая	пространство НКТ	3,0

Для скважины Ново-Ельская 43Т тепловая мощность СТО в ходе проведения опытов также изменялась более чем на порядок. Полученные результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2. Интервал изменения тепловой мощности СТО в скважине Ново-Ельская 43Т

Номер опыта	Темп прокачки, м ³ /час	Схема прокачки	Подача воды в СТО	Тепловая мощность, кВт
1	10	Обратная	Кольцевое пространство	Отбор тепла 11,7 кВт;

				Закачка 14,4 кВт	тепла
2	20	Обратная	Кольцевое пространство	Закачка 166,0 кВт	тепла
3	30	Обратная	Кольцевое пространство	Закачка 58,5 кВт	тепла

В первом опыте при скорости прокачки $10 \text{ м}^3/\text{час}$ и колебании температуры воды на входе в СТО от 14 до 16°C , преобладающая температура на выходе СТО незначительно отличалась (в основном $14\text{--}15^\circ\text{C}$). При этом имел место на отдельных интервалах времени отбор тепла из СТО, но в большинстве случаев – «закачка» тепла в массив горных пород.

В течение второго и третьего опытов имела место только «закачка» тепла в массив горных пород, во время этих опытов температура наружного воздуха в конце весны и в первые дни лета в отдельные часы суток достигала $25\text{--}28^\circ\text{C}$, такая температура была сравнима с температурой на забое скважины на глубине 2000 м – $29,9^\circ\text{C}$. Высокая температура наружного воздуха приводила к нагреванию воды в накопительном баке от атмосферного воздуха. Наибольшая тепловая мощность СТО в скважине Ново-Ельская 43Т, была получена в опыте 2 при прокачках воды с подачей ее в кольцевое пространство (обратная схема циркуляции) и достигала 166 кВт .

Для обратной схемы циркуляции удельная тепловая мощность (мощность на $1 \text{ м}^3/\text{час}$ прокачиваемой воды) для первого опыта (режим «захоронения» тепла) – $1,44$, для второго – $8,3$ и для третьего опыта – $1,95 \text{ кВт}/\text{м}^3$, соответственно. Подчеркнем, что потери вынесенного из СТО тепла в атмосферу через баки либо их нагрев наружным воздухом не учитывались.

В результате проведенных опытов можно отметить, что подача воды в кольцевое пространство обеспечивает более высокую эффективность работы СТО. Его тепловая мощность зависит от ряда параметров и может достигать $150\text{--}200 \text{ кВт}$. Доказана эффективность использования законсервированных и ликвидированных обсаженных колонной скважин Припятского прогиба в качестве теплообменников для отбора либо «закачки» тепла от/в массив горных пород. Проведенный ранее эксперимент по скважине Березинская 1 [Зуй и др., 2010] также подтверждает сделанные выводы.

Литература

Калинин М.И., Баранов А.В. Метод расчета глубинных теплообменников для однокважинной технологии геотермального теплоснабжения / Разведка и охрана недр. № 6. 2003. С. 53-60.

Kohl T., Salton M., Rybach L. Data Analysis of the Deep Borehole Heat Exchanger Plant Weissbad (Switzerland) / Proceedings of the World Geothermal Congress 2000. Kyushu – Tohoku, Japan, May 28 - June 10. 2000. Kyushu – Tohoku. P. 3459-3464.

Зуй В.И., Грибик Я.Г., Сусленко А.Л. Опытные работы по созданию теплообменника в скважине Березинская-1 Припятского прогиба // Проблемы региональной геологии Беларуси. IV Университетские геологические чтения, посвященные 15-летию кафедры динамической геологии БГУ. – Минск, 2–3 апреля 2010 г. (Под ред. проф. Э.А. Высоцкого). С. 69–70.